

公路安全韧性提升在项目全寿命周期的应用研究

王 慧

北京交科公路勘察设计研究院有限公司 北京 100191

摘 要：在“十四五”国家公路安全韧性提升专项行动背景下，文章基于“规划—设计—建设—运维”的全寿命周期理论框架，系统探讨公路安全韧性提升与勘察设计、养护加固的有机联系。通过构建“预防性规划—动态性建设—韧性化提升—智慧化运维”四位一体的全链条协同体系，提出分类分阶段安全韧性提升协同机制，可实现风险前置防控，资源动态优化，服务持续保障，安全效益全寿命周期最优。对早期建设的公路实施防灾抗灾能力补强，对新建项目执行安全韧性导向的全过程管控，对运营期设施建立智慧监测预警体系。研究表明，该机制可实现风险防控前移、应急响应效率提升、全寿命周期成本优化，为构建主动适应性公路防灾体系提供理论支撑和实践路径。

关键词：公路安全韧性提升；全寿命周期；协同机制

引言

党的二十届三中全会明确要求健全现代化基础设施建设体制机制，将交通基础设施韧性提升纳入总体国家安全观框架，强化经济与社会安全基础。《交通强国建设纲要》提出提升基础设施本质安全水平，增强设施耐久性和抗灾能力，贯彻国家综合立体交通网规划对韧性交通网络的系统性部署。

我国地域辽阔，地质与气候条件复杂多变，公路基础设施分布范围广泛，自然灾害具有高度动态性、随机性及破坏性。在全球环境变暖影响下，我国传统区域气候特点已发生较大变化。如主雨带北移，冰灾南移，局部地区极端降水发生的频次和强度均显著增加等。此外，公路网老化问题突出，占比 30% 高速公路运营年限超 15 年。2024 年梅大高速塌方、柞水大桥垮塌等事故，暴露出既有公路设施在极端降水、地震活动带等新型风险下的脆弱性。公路安全韧性提升已成为新形势下面临的主要课题。

1 全寿命周期公路安全韧性提升

全寿命周期公路安全韧性提升涵盖规划立项、勘察设计、工程建设、运营维护、拆除重建或改扩建五个阶段，注重“预测—抵御—恢复—适应”系统提升防灾抗灾能力，强调灾前预防、灾中应急和灾后快速恢复的协同。

既有公路与环境存在相互作用，环境由于常年受多种扰动因素的叠加，会影响项目区域内气象、水文和地质等因素。同时既有公路本身由于运营多年也会反作用于外部环境，从

而影响交通量及地质情况。此外，行业自身技术更新发展，特别是技术标准和规范的升级等，都会导致既有高速公路与极端环境存在较大不适应性，需要通过公路安全韧性提升工作来适应新形势下多变的外部环境因素。

公路安全韧性是表述公路面对自然灾害或极端环境时，抵御外部扰动、保持安全运行和快速恢复的能力，包括冗余性、应变性、稳健性、恢复性、适应性共五个属性。^[1]

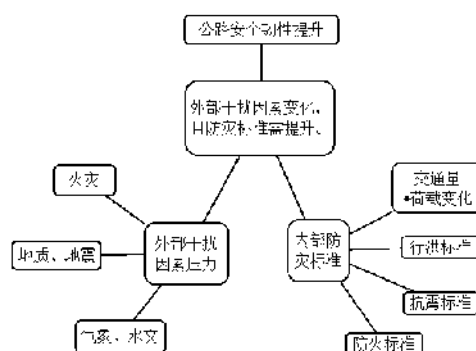


图 1 公路安全韧性提升逻辑图

公路安全韧性提升可以理解针对外部扰动或防灾标准提升，导致行洪、抗震及抗灾压力大于原防灾标准时，项目全过程为应对极端天气及自然灾害等，对于安全韧性不足路段进行抗灾防灾能力提升，必要时可高于现行标准要求。

公路安全韧性提升内容包括基础设施和制度体系两部分^[1]，实现建管并重，效益最优。世界银行与全球减灾与恢复基金（GFDRR）评估显示，在低收入和中等收入国家，

每投入 1 美元用于韧性基础设施建设，可产生约 4 美元的净收益。

2 公路安全韧性提升与勘察设计的关系

公路安全韧性提升是对既有公路项目原勘察设计的外界干扰因素给与动态修正或防灾抗灾冗余度的动态提升。当项目防灾抗灾标准与既有交通量、气候、水文及地质条件不适应时，应予以公路安全韧性提升，主要提升公路基础设施防灾抗灾冗余度，并完善制度体系。实现一个目标：打造安全可靠、经济适用、韧性耐久的现代化公路基础设施。

既有公路项目勘察设计是基于建设前期及当时标准规范体系，针对预测交通量及水文资料进行的系列勘察设计工作。随着时间的推移，项目和环境经相互作用，均会有所变化，当外部干扰因素变化与项目防灾抗灾标准部匹配时，就会出现勘察设计与极端环境或地质灾害不适应，导致防灾抗灾能力冗余性不足。

传统勘察设计以静态规范及勘察数据为基础，行洪抗震标准滞后，难以应对极端气候变化引发的不确定风险。公路安全韧性提升相当于是针对以静态或预测为主的勘察设计做个动态实时补充修正。针对以上问题，公路安全韧性提升应加强极端天气统计预测工作和运营期间检测预警及应急响应体系，可在勘察设计阶段引入“动态基线”理念，针对风险较高的单体、专业或项目工程进行安全韧性提升设计，即利用现有防灾抗灾标准 + 气候修正系数。例如可将针对抗洪风险较高的单体、专业或项目工程，将排水系统设计标准从“5 年一遇”调整为“20 年一遇 + 气候修正系数”，从设计源头提升防灾抗灾能力，避免工程重复建设。

3 公路安全韧性提升与养护加固的关系

公路养护加固是指在公路运营阶段，为恢复或提升结构性能、延长使用寿命而采取的技术措施。

表 2 公路安全韧性提升与公路养护加固对比表

序号	内容	公路安全韧性提升	公路养护加固	备注
1	时期	应贯彻规划前期、建设期和运营期全过程	基于运营期。	
2	基础资料	各阶段勘察或统计预测，以动态修正为主。	运营期勘察或历年统计预测，以静态预测为主。	
3	技术标准	各阶段勘察设计标准规范，特殊情况下可高于现行标准	既有的勘察设计标准规范	
4	内容	基于防灾抗灾能力提升。	日常养护和大中修。	
5	对象	安全韧性不足的单体、专业或项目工程。	全路段、全专业。	
6	工况	应对极端天气或自然灾害。	正常使用工况或地震工况。	
7	特点	改建或养护加固项目的特点。	养护加固特点。	
8	理解	补公路安全韧性短板。	缺陷修复。	

传统养护工程主要为“缺陷修复”，针对以上问题，公路安全韧性提升在运营维护阶段可向“预防性维护”转换，例如通过定期检测评估材料韧性储备，提前干预结构性能衰退。

4 公路安全韧性提升在项目全寿命周期的应用

目前，公路安全韧性提升主要存在的问题：

(1) 阶段割裂：规划、设计、建设、运维各阶段韧性目标不协同。

(2) 技术瓶颈：静态勘察设计参数与动态灾害风险不

匹配。

(3) 风险不确定性：风险发生概率、影响程度和演变过程具有极大的不确定性。

(4) 管理短板：全寿命周期数据贯通与决策联动不足。

针对以上问题，提出分级分类分阶段公路安全韧性提升协同机制即“预防性规划、动态性建设、韧性化提升、智慧化运维”全链条协同机制，最终实现风险前置防控，资源动态优化，服务持续保障，安全效益全寿命最优。

表 3 公路安全韧性提升协同机制表

序号	全寿命周期	建设阶段	公路安全韧性提升协同机制		分级分类分阶段处治目标		备注
1	规划	预可和工可阶段	预防性规划	全寿命周期韧性化提升	风险前置防控	安全效益全寿命最优	
2	设计	两阶段勘察设计阶段			资源动态优化		
3	建设	施工阶段	动态性建设		服务持续保障		
4	运维	运营戒烟	智慧化运维				

风险分级分类主要依据两要素：灾害发生概率等级和灾害影响等级。建立四级风险分类标准（如红/橙/黄/蓝），基于灾害发生概率与风险影响程度按照避让、跨越、治理和预警等原则分类处治，进行安全韧性系统综合提升。

依据分级分类灾害，采用分阶段重点处治方案。

（1）规划阶段以预防为主

在原规划基础上，深化地质走廊带比选，规避高灾害风险区（如岩溶发育区、煤系地层、地震高发区的地质断裂带等）；加强地质灾害评价，从源头上避免穿越地质复杂和高风险区；引入安全韧性提升指标进行走廊带综合比选。

（2）设计阶段以预防为主

加强地质勘察，突出重点路段地质和水文勘察，必要时考虑地质动态演变的不利影响。加强对滑坡、崩塌、泥石流、湿陷性黄土、膨胀土等不良地质路段和临河、陡坡路基水文地质勘察，加强水文勘察和洪水位调查及演变分析。

全面提升设计质量，深化地质选线、水文选线和安全韧性选线。引入安全韧性指标综合比选，加强路桥和路隧方案比选；细化路基工点设计，完善排水系统设计，做好桥涵构造物基础设计，加强隧道选址及风险评估；必要时可采用超标准设计，提升安全韧性储备。

在地质勘察基础上，加强针对性设计，引入动态基线理念，必要时可进行安全韧性提升专项设计。

（3）施工阶段以提升为主

施工中应加强高风险和较高风险路段或工点施工质量，完善隐蔽工程验收标准。

加强设计变更管理，设计变更不应降低原设计公路安全韧性指标。

（4）运维阶段以提升为主

运营维护阶段，应加强自然灾害风险排查，灾害防治工程力度，提升检测预警能力，并完善应急制度体系。

高风险和较高风险路段或工点应构建北斗+智能监测系统，实时感知边坡位移与桥隧结构健康；建立多方联动的动态闭环反馈机制和应急预案；建立三张清单管理模式即风险清单、任务清单和责任清单；实现跨部门数据共享即交通、气象、国土数据实时交互共享；实现项目全周期、全过程、全方位、全要素安全韧性提升。

5 结语

在“十四五”国家公路安全韧性提升专项行动背景下，文章系统解析公路安全韧性提升与勘察设计、养护加固的有机联系。并针对公路安全韧性提升存在“阶段割裂、标准静态化、技术离散化、风险不确定性”等问题，提出分类分阶段公路安全韧性提升协同机制，即构建“预防性规划、动态性建设、韧性化提升、智慧化运维”四位一体的全链条协同机制，最终实现风险前置防控，资源动态优化，服务持续保障，安全效益全寿命周期最优。研究成果通过全寿命周期视角整合技术革新与制度创新，推动公路工程从“被动抗灾”向“主动适应”的根本转变，最终实现“风险可防、灾时可抗、损后可复”的韧性公路体系。

参考文献：

[1] 公路安全韧性提升技术指南（试行版）. 北京：人民交通出版社，2025。

作者简介：王慧（1983—），男、汉族，呼和浩特市，大学本科，高级工程师，一直从事高速公路勘察设计咨询工作。